УБР ВАТ "Укрнафта" на свердловині №522-Долина при бурінні в інтервалі 1703-2137 м.

В результаті випробувань встановлено, що наробіток штоків серійного виробництва становив 225-240 годин, а наробіток штоків зміцнених за розробленою технологією 360-403 години. Таким чином, зносостійкість робочих поверхонь штоків зміцнених плазмовим порошковим покриттям в 1,6-1,68 рази більша, ніж поверхні штоків зміцнених СВЧ. Також встановлено, що знос сальникових ущільнень штоків в 1,25-1,28 рази більший при випробуваннях стандартних штоків порівняно із штоками робоча поверхня яких зміцнювалась за технологією плазмово-дугового композиційного напилення порошковими матеріалами.

Вища зносостійкість зразків зміцнених плазмовим покриттям пояснюється одержаною оптимальною зносостійкою композиційною структурою поверхні штока вузла шток-ущільнення штока бурових насосів.

За результатами промислових випробувань ВАТ "Укрнафта" запропонована технологія зміцнення робочої поверхні штоків рекомендована до впровадження у виробництво.

Література

1 Антошин Е.И. Газотермическое напыление покрытий. – М.: Машиностроение, 1974. – 96 с.

2 Гладкий С.И., Климишин Я.Д., Парайко Ю.И. Механизм износа пары трения шток-манжета и средства износостойкости / Ивано-Франковск. гос.техн. ун-т нефти и газа. – Ивано-Франковск, 1996. – 15 с.: ил. – Библиогр.: 8 назв. –Укр. – Деп. в ГНТБ Украины_06.05.96, № 1138-Ук96 // Анот. в Р.Ж. Горное дело. – 1997. – Реф. 1Г193Деп.

3 Мислюк М.А., Рибчич І.Й., Яремійчук Р.С. Буріння свердловин: Довідник в 5 т. – К.: Інтерпрес ЛТД, 2002. –Т.2: Промивання свердловин. Відробка доліт. – 298 с.

4 Иогансен К.В. Спутник буровика: Справочник. – 3-е изд. – М.: Недра, 1990. – 303 с.

5 Крагельський И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчётов на трение и износ. – М. :Машиностроение, 1977. – 526 с.

6 Гладкий С.І. Дослідження структур та властивостей покрить одержаних плазмовим методом // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 1997. – № 34. – С. 153-159.

7 Мур Д. Трение и смазка эластомеров. – М.: Химия, 1977. – 264 с.

8 Куприянов И.Л., Шипко А.А. Исследование износостойкости рутиловых и никель-титановых газотермических покрытий на титане // Трение и износ. – 1986. – Т. 7. – № 4. – С. 722-725.

УДК 621.64.029:622.691.4

ЗАВИСИМОСТЬ ОБЪЕМА ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ ОТ КОЛИЧЕСТВА СТЕНДОВ ДЛЯ РЕМОНТА ГПА

[1]Б.В.Копей, [1]А.Беллауар, [2]А.Бенмуна

[1] ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166
e-mail: yozh@nung.edu.ua

[2] Университет М' амед Буггара, Факультет нефти, газа и химии,
Лаборатория надежности нефтяного оборудования и материалов,
Бумердес, Алжир, 35000

Проаналізовано залежність об'єму запасних частин від кількості стендів для ремонту ГПА, що знаходяться в ремонтній майстерні. Виведено формули для обчислення ймовірності зайнятості і безаварійності роботи стендів, а також існування черги на очікування ремонту. Зроблено висновок, що підвищення надійності ГПА можна досягти шляхом врахування витрат запчастин і їх оптимізації.

Dependence of volume of spare parts on the number of stands for the GPA repair, being in a repair shop, is analysed. Formulas for the calculation of probability of employment and accident-free of work of stands, and also existence of turn on expectation of repair are shown out. A conclusion is done, that increase of the GPA reliability it is possible to attain by the account of expenses of repair parts and their optimization.

Введение

Управлять складом запасных частей — это значит гарантировать возможность поддержания газоперекачивающего агрегата (ГПА) в рабочем техническом состоянии функционирования в течение срока, определенного до предупредительного ремонта с заданной надежностью [1]. Это также означает, что в службе ремонта ГПА необходимо иметь в наличии определенное количество запасных частей для выполнения этого ремонта с целью сокращения к минимуму времени форсированных остановок машин. Количество запасных частей зависит от многих факторов, а именно от [2, 3]:

– коэффициента технического использования ГПА и технического уровня эксплуатации;

– степени износа элементов ГПА;

– срока работы между ремонтами ГПА;

– структуры ремонтного цикла ГПА;

– качества ремонта и стратегий технического обслуживания.

Характеристика различных типов аварий ГПА

Различают следующие типы аварий в процессе эксплуатации ГПА:

– случайные аварии;

– постепенные аварии (обусловленные износом);

– аварии восстанавливаемых элементов;

– аварии невосстанавливаемых элементов.

Случайные аварии: количество аварий не известно заранее, но может быть оценено на основании теории надежности.

Постепенные аварии: зная эволюцию износа и его закономерности, можно определить количество ожидаемых ремонтов.

Невосстанавливаемые элементы: они могут быть заменены запасными частями со склада.

Восстанавливаемые элементы:

– на компрессорной станции: количество запчастей обычно уменьшено в объеме.

– на базе обслуживания: необходимо предусматривать запас деталей и узлов на складе в достаточном объеме.

Критерий оценки количества запасных частей

Среднее время ремонта агрегата может быть определено следующим образом:

$$T_{срр} = T_{ра} + T_{адм} + T_{доп} + T_{вв} , \qquad (1)$$

где: $T_{ра}$ – время, потраченное на ремонт (активная работа);

$T_{адм}$ – время, потерянное из-за административных затруднений (вызов бригады, транспортирование материалов и т.д.);

$T_{доп}$ – время, потерянное из-за других причин (отсутствие энергии, аварии системы, нехватка материалов и т.д.);

$T_{вв}$ – время, потерянное из-за отсутствия запчастей (время ожидания поставки).

Формула (1) после упрощения может принять следующую форму:

$$T_{срр} = T_1 + T_{вв} ,$$

где: T_1 – время ремонта резервного агрегата, с той оговоркой, что нет проблем с запчастями (случай ± идеальный);

$$T_1 = T_{ра} + T_{адм} + T_{доп} . \qquad (2)$$

Значение $T_{вв}$ может быть рассмотрено как критерий достаточности запасных частей. Количество запасных деталей оказывает влияние на коэффициент готовности оборудования. Связь, которая существует между коэффициентом достаточности в запасных частях $P_{ар}$ и коэффициентом готовности $K_{гот}$, описывается зависимостью:

$$K_{гот} = \frac{T}{T + T_{срр}} = \frac{T}{T + T_1 + T_{вв}} \Rightarrow \qquad (3)$$

$$K_{гот} = \frac{T}{T + T_1} \cdot \frac{T + T_1}{T + T_1 + T_{вв}} = K'_{гот} \cdot P_{ар} , \qquad (4)$$

где

$$K'_{гот} = \frac{T}{T + T_1} ; \qquad (5)$$

$K'_{гот}$ – коэффициент готовности, в случае, когда в наличии имеются запчасти.

$$P_{ар} = \frac{T + T_1}{T + T_1 + T_{вв}} . \qquad (6)$$

Здесь

$$T = \sum T_{cpi} \quad \text{и}$$

$$T_{срр} = \sum T_{рем_i} = \sum \left(T_i + T_{вв}\right),$$

где $T_{срі}$ и $T_{рем_і}$ – i-тая средняя наработка на отказ и среднее время ремонта ГПА соответственно.

Из формулы (6) замечаем, что коэффициент $P_{ар}$ оказывает сильное влияние на параметры надежности оборудования. Анализ этой формулы позволяет нам заключить, что для того, чтобы увеличивать коэффициент готовности $K_{гот}$, нужно:

– определить количество запасных частей, которые надо иметь в складе, с одной стороны;

– устранить все препятствия, которые мешают нормальному снабжению запасными частями ($T_{вв} \to 0$) с другой стороны.

Стратегии технического обслуживания ГПА

Разработано несколько стратегий технического обслуживания ГПА (рис.1).

Исследование выбора периода лучшей замены позволяет сократить количество аварий, вызванных износом и вероятностью отказов агрегата.

Случай восстанавливаемых деталей при случайных авариях

Количество запасных частей зависит:

– от кадровых и материальных возможностей ремонтного цеха;

– от организации службы технического обслуживания.

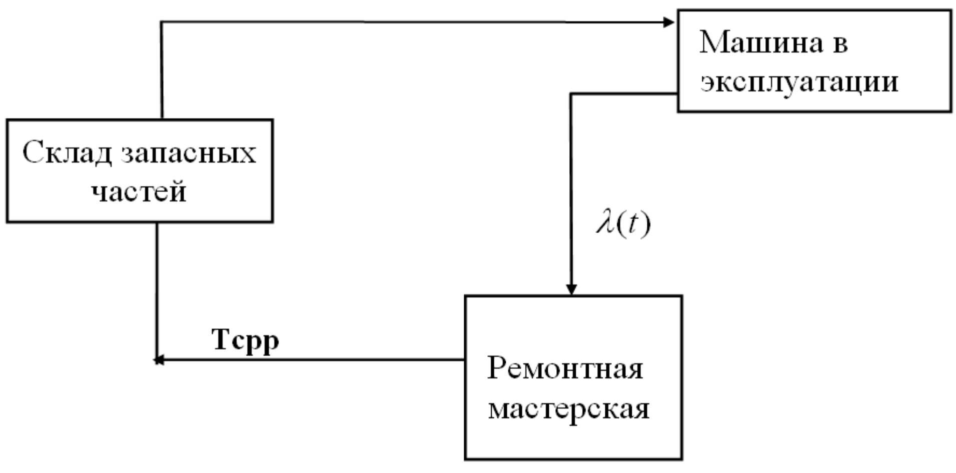
а) базовая стратегия (стратегия аварийного обслуживания)

б) групповая стратегия (замена группой или модулем)

в) стратегия индивидуальной замены
(в зависимости от срока функционирования)

ПР – плановый ремонт; А – авария

Рисунок 1 — Схемы стратегий технического обслуживания ГПА



Тсрр – среднее время ремонта

Рисунок 2 — Случай восстанавливаемых деталей

Если $T_{срр}$ увеличивается с интенсивностью отказов $\lambda(t)$, тогда количество необходимых запчастей также увеличивается. $T_{срр}$ может также увеличиться, когда довольно слабы возможности ремонтной мастерской (отсутствие стендов для ремонта, нехватка квалифицированной рабочей силы и т.д.).

Условие обеспечения надежности функционирования ремонтной мастерской

$$\Lambda(t) \le \beta(t), \qquad (7)$$

где

$$\Lambda(t) = N \cdot \text{л}(t) = \frac{N}{T_{ср}}, \qquad (8)$$

$$\text{в}(t) = N \cdot \text{м}(t) = \frac{n}{T_{срр}}. \qquad (9)$$

Здесь:

$\Lambda(t)$ – интенсивность отказов всех элементов агрегата;

$\beta(t)$ – интенсивность ремонтов в мастерской;

N – количество идентичных деталей в наблюдении;

n – количество синхронных ремонтов (количество стендов для ремонта);

$\lambda(t)$ – интенсивность отказов детали;

м(t) – интенсивность ремонта детали;

$T_{срр}$ – в среднее время ремонта;

$T_{ср}$ – среднее время функционирования между отказами.

Отсюда определяем количество необходимых ремонтных стендов:

$$n \geq \frac{N \cdot T_{cpp}}{T_{cp}} . \quad (10)$$

Если обозначим через c общее количество аварий, предвиденных на период ремонта ($T_{срр} = T_{ср}$), тогда:

$$\rho = \frac{N \cdot T_{cpp}}{T_{cp}} = \frac{\lambda \cdot (t) \cdot N}{\mu(t)} \quad (11)$$

можем записать, что $n \cong c$ (n – целое положительное число, большее чем c).

Во время аварии машины возникает потребность в запчастях. Если на складе запчасти отсутствуют, то потерпевший аварию ГПА будет в ожидании ремонта. После ремонта запчасти возвратят на склад и стенд будет свободен.

Количество деталей, находящихся в ожидании ремонта, обозначено k. Чтобы оценить службу технического обслуживания надо было бы определить вероятность P_i того, что в любой момент по крайней мере одна деталь данного типа будет доступна, то есть, что по крайней мере один стенд окажется свободным.

$$P_i = 1 - P_Z , \quad (12)$$

где

$$P_Z = P_{n+k} . \quad (13)$$

P_z может быть рассмотрена как вероятность того, что все имеющиеся детали являются дефектными и пребывают либо в ремонте, либо в ожидании ремонта.

Чтобы обеспечивать наличие запчастей требуется, чтобы коэффициент готовности R_i был меньше P_i:

$$P_i \geq R_i .$$

Требуемое значение R_i выбирается из экономических соображений и связано с возникающими при этом затратами:

– с одной стороны, закупка большого количества запчастей увеличивает надежность функционирования системы, но возникает риск спровоцировать замораживание запасов на складе;

– с другой стороны, отсутствие запчастей уменьшает расходы, но возникает риск остановки производства (увеличение времени форсированных остановок ГПА).

Анализ возможных вариантов

Пусть в ремонтной мастерской имеется n стендов для ремонта. В течение срока эксплуатации можем иметь среди этих стендов 0,1,2,3...... m, n занятых.

Случай, когда нет деталей, ожидающих ремонта, то есть дефектная деталь, находя все стенды для ремонта занятыми, покидает очередь ожидания, не будучи исправлена (то есть $k = 0$). На стендах не имеется очереди.

Вероятность того, что m стендов будут заняты, может быть выражена следующей формулой:

при $0 \leq m \leq n$ и $k = 0$

$$Pm = \frac{\frac{\rho^m}{m!}}{\sum_{a=0}^{n} \frac{\rho^a}{a!}} , \quad (14)$$

где:

$$\rho = \frac{N \cdot T_{cpp}}{T_{cp}} = \frac{\lambda(t) \cdot N}{\mu(t)} ;$$

$\lambda(t)$ – интенсивность отказов детали;

$\mu(t)$ – интенсивность ремонта детали,

a – порядковый номер.

Вероятность того, что n стендов будут заняты (то есть все стенды) может быть представлена так ($m = n$ и $k = 0$, отсутствие очереди):

$$Pn = \frac{\frac{\rho^n}{n!}}{\sum_{a=0}^{n} \frac{\rho^a}{a!}} . \quad (15)$$

Случай, когда дефектные детали, находя n стендов занятыми, остаются в очереди некоторое время и затем покидают ее, не будучи исправлены.

Количество деталей в очереди ожидания ремонта равно k.

Вероятность того, что m стендов окажутся занятыми, может быть представлена так ($0 \leq m \leq n$, отсутствие очереди):

$$Pm = \frac{\frac{\rho^m}{m!}}{\sum_{a=0}^{n} \frac{\rho^a}{a!} + \frac{\rho^n}{n!} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\rho^k}{\prod_{j=1}^{k} (n + j\beta)}} , \quad (16)$$

где: β – количество деталей, оставляющих очередь после некоторого времени ожидания, не будучи исправленными;

k – общее количество деталей в ожидании ремонта.

Вероятность того, что n стендов будут занятыми и k количество деталей находится в ожидании ремонта запишется так:

$$(m = n + k;\ m > n;\ k \geq 1).$$

Среди этого количества k деталей, ожидающих ремонта, некоторое количество равное β, покидает очередь, не будучи исправлено.

$$P_{n+k} = \frac{\dfrac{\rho^n}{n!} \cdot \dfrac{\rho^k}{\prod_{j=1}^{k}(n + j\beta)}}{\sum_{a=0}^{n} \dfrac{\rho^a}{a!} + \dfrac{\rho^n}{n!} \sum_{k=1}^{\infty} \dfrac{\rho^k}{\prod_{j=1}^{k}(n + j\beta)}} \qquad (17)$$

Если рассматриваем случай, когда все дефектные детали в ожидании ремонта будут исправлены рано или поздно (то есть не оставят очереди), можно оценить как в $\to 0$. В этом случае запишем:

1) для $0 \leq m \leq n$ и $k = 0$ (все дефектные детали использованы; не имеется очереди ожидания)

$$Pm = \frac{\dfrac{\rho^m}{m!}}{\sum_{a=0}^{n} \dfrac{\rho^a}{a!} + \dfrac{\rho^n}{n!} \sum_{k=1}^{\infty} \dfrac{\rho^k}{n^k}}. \qquad (18)$$

Принимая в расчет

$$\sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{\rho}{n}\right)^k = \frac{\rho}{n-\rho} \quad \text{при} \quad \rho < n, \qquad (19)$$

тогда формула (18) преобразуется к виду:

$$Pm = \frac{\dfrac{\rho^m}{m!}}{\sum_{a=0}^{n} \dfrac{\rho^a}{a!} + \dfrac{\rho^{n+1}}{n!(n-\rho)}}. \qquad (20)$$

2) Для $m = n + k$; $m > n$; $k \geq 1$ формула (171) запишется:

$$P_{n+k} = \frac{\dfrac{\rho^{n+k}}{n!\,n^k}}{\sum_{a=0}^{n} \dfrac{\rho^a}{a!} + \dfrac{\rho^{n+1}}{n!(n-\rho)}}. \qquad (21)$$

Пусть $Z = n + k$ – количество необходимых запасных частей. Тогда с учетом (13) $P_Z = P_{n+k}$ и имея $Pi = 1 - Pz \cong Ri$ – вероятность того, что в любой момент, по крайней мере, одна деталь данного типа будет доступной, то есть, что по крайней мере хотя бы один стенд окажется свободным, получим:

$$P_Z = 1 - R_i = P_{n+k} = \frac{\dfrac{\rho^{n+k}}{n!.n^k}}{\sum_{a=0}^{n} \dfrac{\rho^a}{a!} + \dfrac{\rho^{n+1}}{n!(n-\rho)}}. \qquad (22)$$

Проблема состоит в том, чтобы найти количество Z запасных частей, которые надо иметь на складе в ожидании ремонта деталей, посланных в мастерскую, и избежать таким образом продолжительного простоя машины.

Формулировка для определения Z, полученная после превращения формулы (22), будет иметь вид:

$$Z = n + \frac{ln\left[\dfrac{n!}{\rho^n}\left(\sum_{a=0}^{n} \dfrac{\rho^a}{a!} + \dfrac{\rho^{n+1}}{n!(n-\rho)}\right)(1 - Ri)\right]}{ln\left(\dfrac{\rho}{n}\right)} = n + k, \qquad (23)$$

где

$$\frac{ln\left[\dfrac{n!}{\rho^n}\left(\sum_{a=0}^{n} \dfrac{\rho^a}{a!} + \dfrac{\rho^{n+1}}{n!(n-\rho)}\right)(1 - Ri)\right]}{ln\left(\dfrac{\rho}{n}\right)} = k. \qquad (24)$$

Здесь:

n – количество стендов для ремонта;

ρ – количество элементов, претерпевших аварию в течение периода ремонта;

R_i – надежность, которой требуют от системы ремонта $R_i = 1 - P_z \cong 1$;

k – количество деталей в ожидании ремонта.

Пример 1

Расчет приведен в таблице 1.

Пример 2

В мастерской, имеющей 2 стенда для ремонта, пребывают дефектные детали (лопасти турбины ВД), имеющие $T_{CP} = 7500$ часов наработки. Время ремонта лопастей равно 132 часа. Количество элементов N в системе равно 80.

1) определить, существует ли постоянный режим обслуживания ГПА ($\Lambda(t) \leq \beta(t)$)

2) если да, то найти вероятность того, что 0, 1,2 стенда будут заняты;

3) найти вероятность безаварийной работы;

4) найти вероятность существования очереди ожидания ремонта.

Решение:

1) Определим среднее количество аварий, которые возникают в период ремонта (формула 11):

Таблица 1 — Пример расчета

Количество идентичных элементов, N	Среднее время работы, $T_{ср}$, (часов)	Среднее время ремонта, $T_{срр}$, (часов)	Коэффициент готовности, Ri	Количество аварий, предусмотренных в течение ремонта, ρ, ф-ла (11)	Количество стендов для ремонта, n ф-ла (10)	Количество деталей в ожидании ремонта, k ф-ла (24)	Количество запчастей на складе, z ф-ла (23)
40	2000	20	0,99	0,4	1	$\cong 4$	5
80	7500	132	0,99	1,40	2	$\cong 8$	10

$$\rho = \frac{N \cdot T_{cpp}}{T_{cp}} = \frac{\lambda(t) \cdot N}{\mu(t)} = \frac{80.132}{7500} = 1{,}4$$

или ($c = л \cdot N \cdot T_{срр}$).

Так как $\rho < n$ $(1{,}4 < 2)$, можем сказать, что постоянный режим техобслуживания установлен.

2) Определим вероятности P_0; P_1; P_2 согласно формуле (20):

$$P_0 = \frac{1}{5{,}668} = 0{,}1764 = 17{,}64\,\%;$$

$$P_1 = \frac{1{,}4}{5{,}668} = 0{,}247 = 24{,}70\,\%;$$

$$P_2 = \frac{0{,}98}{5{,}668} = 0{,}173 = 17{,}30\% .$$

3) Определим надежность системы, то есть вероятность отсутствия аварий в течение периода ремонта:

$$P(0,t) = e^{-\rho} = e^{-1{,}4} = 0{,}2446 = 24{,}46\,\%.$$

4) Вероятность существования очереди:

$$\prod = 1 - (0{,}1764 + 0{,}247 + 0{,}173) = $$
$$= 0{,}4036 = 40{,}36\,\% .$$

Примечание; если в примере 1 для:

1) $\rho = 0{,}4$ берем $n = 2$, тогда согласно (28) находим:

$$k = 1{,}04 \text{ и } Z = n + k \cong 3.$$

2) $\rho = 1{,}4$ берем $n = 3$, тогда согласно (28) находим:

$$k = 3{,}12 \text{ и } Z = n + k \cong 7.$$

Для второго случая ($\rho = 1{,}4$ и $n = 3$) вероятности наличия занятых стендов $n = 0, 1, 2, 3$ равна

$$P_0 = 23{,}60\,\%;\ P_1 = 33\,\%;$$

$$P_2 = 23{,}12\,\%;\ P_3 = 10{,}79\,\%.$$

Вероятность наличия очереди равна

$$\prod = 1 - (0{,}2326 + 0{,}33 + 0{,}2312 + 0{,}1079) = $$
$$= 10{,}27\,\%.$$

Средняя длина очереди равна:

$\rho = 1{,}4$ и $n = 3$

$$m = \frac{\dfrac{n \cdot \rho^{n+1}}{n!(n-\rho)^2}}{\sum\limits_{a=0}^{n} \dfrac{\rho^a}{a!} + \dfrac{\rho^{n+1}}{n!(n-\rho)}} = 0{,}177;$$

$\rho = 1{,}4$ и $n = 2$ $\quad m = 1{,}345.$

1-ый случай. Ремонт без очереди. ($0 \le m \le n;\ k = 0$)

Дифференциальные уравнения для вероятностей $p_1(t)$, $p_2(t)$ ..... $p_n(t)$ запишутся:

$$\frac{dp_0(t)}{dt} = -\lambda p_0(t) + \mu p_1(t);$$

....

$$\frac{dp_m(t)}{dt} = \lambda p_{m-1}(t) - (\lambda + m\mu) p_m(t) +$$
$$+ (m+1)\mu p_{m+1}(t) \qquad 0 < m < n;$$

....

$$\frac{dp_n(t)}{dt} = \lambda p_{n-1}(t) - n\mu p_n(t).$$

Если $t \to \infty$, тогда

$$p_0(t), p_1(t), p_2(t), \ldots, p_n(t) \to\ p_0; p_1; p_2; \ldots; p_n$$

и все производные равны нулю. Тогда можем написать алгебраические уравнения:

$$-\lambda p_0 + \mu p_1 = 0;$$

$$\lambda p_0 - (\lambda + \mu) p_1 + 2\mu p_2 = 0;$$

....

$$\lambda p_{m-1} - (\lambda + m\mu) p_m + (m+1)\mu p_{m+1} = 0$$
$$0 < m < n;$$

....

$$\lambda p_{n-2} - [\lambda + (n-1)\mu] p_{n-1} + n\mu p_n = 0;$$

$$\mu p_{n-1} - n\,\mu\, p_n = 0.$$

Решая приведенную ниже систему уравнений, получаем выражение p_m:

$$p_m = \frac{\lambda m}{m!\,\mu^m} \cdot p_0 .$$

С другой стороны $\dfrac{\lambda}{\mu} = \rho_i$; тогда

$$p_m = \frac{\rho_i^{\,m}}{m!} \cdot p_0 \ .$$

Принимая в расчет, что

$$\sum_{a=0}^{n} p_a = p_0 \sum_{a=0}^{n} \frac{\rho_i^{\,a}}{a!} = 1 ,$$

получаем

$$P_0 = \frac{1}{\sum\limits_{a=0}^{n} \frac{\rho^a}{a!}} ,$$

откуда

$$P_m = \frac{\frac{\rho^m}{m!}}{\sum\limits_{a=0}^{n} \frac{\rho^a}{a!}} ,$$

т.е. вероятность того, что m стендов будут занятыми среди n существующих.

2-й случай. Система очереди с убыванием

Дифференциальные уравнения для вероятных состояний системы запишутся:

$$\frac{dp_0(t)}{dt} = -\lambda p_0(t) + \mu p_1(t) ;$$

....

$$\frac{dp_m(t)}{dt} = \lambda p_{m-1}(t) - (\lambda + m\mu) p_m(t) +$$
$$+ (m+1)\mu p_{m+1}(t) \qquad 0 \le m \le n-1 ;$$

....

$$\frac{dp_n(t)}{dt} = \lambda p_{n-1}(t) - (\lambda + n\mu) p_n(t) + (n\mu + \nu) p_{n+1} ;$$

....

$$\frac{dp_{n+k}(t)}{dt} = \lambda p_{n+k-1}(t) - (\lambda + n\mu + k\nu) p_{n+k}(t) +$$
$$+ \left[n\mu + (k+1)\nu \right] p_{n+k+1}(t) .$$

Даже если $t \to \infty$, тогда

$$p_0(t), p_1(t), p_2(t), ..., p_n(t) \to p_0; p_1; p_2; ...; p_n$$

и любые производные равны нулю. Тогда можем написать алгебраические уравнения:

$$-\lambda p_0 + \mu p_1 = 0 ;$$

$$\lambda p_0 - (\lambda + \mu) p_1 + 2\mu p_2 = 0 ;$$

....

$$\lambda p_{m-1} - (\lambda + m\mu) p_m + (m+1)\mu p_{m+1} = 0$$
$$0 \le m \le n-1 ;$$

....

$$\lambda p_{N-1} - (\lambda + n\mu) p_N + (N\mu + \nu) p_{n+1} = 0 ;$$

....

$$\lambda p_{N+k-1} - (\lambda + n\mu + k\nu) p_{N+k} +$$
$$+ \left[N\mu + (k+1)\nu \right] p_{N+k+1} = 0 .$$

Для всего $m \le n$ имеем:

$$p_m = \frac{\rho i^m}{m!} \cdot p_o .$$

Для всего $m \le n$ $(m = n + k$ и $k \ge 1)$

$$p_{n+k} = \frac{\rho i^{n+k}}{n! \prod\limits_{j=1}^{k} (n + j\beta)} \cdot p_o .$$

Когда

$$p_o = \frac{1}{\sum\limits_{a=0}^{n} \frac{\rho^a}{a!} + \frac{\rho^n}{n!} \sum\limits_{k=1}^{\infty} \frac{\rho^k}{\prod\limits_{j=1}^{k} (n + j\beta)}} .$$

Литература

1 P.Lyonnet. La maintenance. Mathématique et méthodes. – Paris: Lavoisier, 1988. – 246 pp.

2 Копей Б.В. Лівак І.Д. Бучинський М.Я. Оптимізація об'єму запасних частин та періодичності їх постачання // Нафтова і газова промисловість. – 1996. – № 3. – С.30-31.

3 Копей Б.В. Розрахунок, монтаж і експлуатація бурового обладнання: Підручник для студентів нафтових вузів. – Івано-Франківськ: Факел, 2001. – 446 с.